



L+T GASETECHNIK Klöpper-Waldmann GmbH & Co. KG
Martener Str. 535 - 44379 Dortmund

Pilotanlage Stickstoffrecycling

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32556/01-24/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Kfm. Alexander Carl Hanf

Dortmund, Januar 2017



Bezugsmöglichkeit:

LT GASETECHNIK

Martener Str. 535

44379 Dortmund

Telefon: 0231 961070-0

mail@lt-gasetechnik.com

L+T GASETECHNIK Klöpper-Waldmann GmbH & Co. KG
Martener Str. 535 - 44379 Dortmund

Pilotanlage Stickstoffrecycling

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32556/01-24/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Kfm. Alexander Carl Hanf

Dortmund, Januar 2017

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	32556/01	Referat	24/2	Fördersumme	112.444 €
Antragstitel Pilotanlage Stickstoffrecycling					
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
12 Monate		01.05.2015			
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger L+T Gasetechnik Klöpper-Waldmann GmbH & Co. KG Herr Alexander Hanf Martener Str. 535 44379 Dortmund				Tel 0231 96 10 7012 Fax 0231 61 38 44	
				Projektleitung Alexander Hanf	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner					
 Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens In vielen thermischen Prozessen werden Schutzgasgemische mit hohem Stickstoffanteil eingesetzt, um die behandelten Produkte vor dem Sauerstoffanteil der Luft zu schützen. Nach der Nutzung im Prozess wird das Schutzgas typischer Weise in die Atmosphäre abgegeben. Im Rahmen des Vorhabens soll eine innovative Anlage entwickelt werden, die das Schutzgas so aufbereitet, dass es wieder Einsatzqualität erhält. Bei einer erfolgreichen Entwicklung würden weniger, bisher ungereinigte, Gase in die Umwelt gelangen und es würde eine Energieeinsparung durch die reduzierte Frischgasherstellung erreicht. Somit wird die Gesamt-CO2-Bilanz des Herstellungsprozesses verbessert.					
 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden Prebasic-Engineering, Kostenermittlung und Betreibersuche ermöglichen die Fixierung der Auslegungsgrundlagen. Auf Basis einer noch im Detail zu bestimmenden innovative Kombination aus Wärmerückgewinnung, Filterung, Adsorption und Desorption, kann nach einer wahrscheinlich positiven Wirtschaftlichkeitsabschätzung mit Entwicklung und Bau einer Demonstrationsanlage begonnen werden. Diese Anlage soll einen Teil des verbrauchten Schutzgases so aufbereiten auf, dass es wieder Einsatzqualität erhält. Zugehörige Analysetechnik liefert die nötigen Informationen für den Betrieb der Anlage. Sind die Demonstrationsergebnisse und die Wirtschaftlichkeit positiv kann auf Basis der Ergebnissen des Vorhabens eine Anlage im Produktionsmaßstab angeboten werden und die Demonstrationsanlage an anderen Anlagen temporär verwendet werden, um auch dort – mit den jeweils unterschiedlichen Gaszusammensetzungen – den Verfahrensnachweis zu führen und das Verfahren proaktiv zu bewerben.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	7
1.1	Abbildungen	7
1.2	Tabellen	7
2	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	8
3	Zusammenfassung	9
3.1	Durchgeführte Untersuchungen	9
3.2	Erzielte Ergebnisse	9
3.3	Empfehlungen für das weitere Vorgehen	9
3.4	Förderung des Vorhabens.....	9
4	Einleitung	10
4.1	Das Vorhaben „Pilotanlage Stickstoffrecycling“	10
4.2	Das Unternehmen LT GASETECHNIK	11
4.3	Zielsetzung und Umweltwirkung des Projekts	12
4.3.1	Zusammensetzung verunreinigter Schutzgase	12
4.3.2	Umweltwirkung Frischgaserzeugung	13
5	Hauptteil	14
5.1	Arbeitsschritte, Methoden, Ergebnisse.....	14
5.1.1	Basic-Engineering	15
5.1.2	Ermittlung der Wirtschaftlichkeit.....	17
5.1.3	Betreibersuche	20
5.1.4	Spezifikation, Entwicklung und Bau der Demonstrationsanlage.....	22
5.1.5	Demonstration und Test	26
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	27
5.3	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung.....	28
5.3.1	Ökologische Bewertung.....	28
5.3.2	Technologische Bewertung.....	28



5.3.3	Ökonomische Bewertung.....	28
5.4	Verbreitung der Vorhabenergebnisse.....	29
5.4.1	Fortführung der Demonstration.....	29
5.4.2	Ausweitung in den Produktionsmaßstab.....	29
5.4.3	Veröffentlichungen.....	29
6	Fazit	31
7	Literaturverzeichnis	32

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

1.1 Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht Verfahrensschritte für das Stickstoff-Recycling.....	15
Abbildung 2: Schematischer Ausschnitt der FBA8 [(Lewandowski & Nothacker, 2014)].....	16
Abbildung 3: Verfahrensfliessbild des Pilot-NRS	23
Abbildung 4: Aufbau des Pilot-NRS im 3-D-Diagramm.....	24
Abbildung 5: Pilot-NRS während der Fertigung. Stand Anfang August 2016.....	25
Abbildung 6: Pilot NRS im Stahlwerk November 2016	26

1.2 Tabellen

Tabelle 1: Mögliche Schutzgas-Verunreinigungen	12
Tabelle 2: Schutzgaskosten für 400 Nm ³ /h im Flachglaswerk - ohne NRS.....	18
Tabelle 3: Kosten und Amortisation eines LTG-NRS für 400 Nm ³ /h.....	19

2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

barü	bar Überdruck. Druck gemessen in Bar über dem vorherrschenden natürlichen Atmosphärendruck
CO ₂	Kohlenstoff-Dioxid
H ₂	Wasserstoff
H ₂ S	Schwefelwasserstoff(e)
LTG	L+T GASETECHNIK Klöpfer-Waldmann GmbH & Co. KG
N ₂	Stickstoff
Nm ³ /h	Norm-Kubikmeter pro Stunde
NRS	Nitrogen Recycling System – Anlage zum Recyceln des gebrauchten Stickstoffs
PE	Poly-Ethylen
Pilot-NRS	Pilotanlage mit einer Recyclingkapazität von bis zu ca. 100 Nm ³ /h gebrauchten Stickstoffs
Produktion-NRS	Anlage in Produktionsgröße mit einer Recyclingkapazität von voraussichtlich ca. 400...600 Nm ³ /h gebrauchten Stickstoffs

3 Zusammenfassung

3.1 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen des Projekts durchgeführte Prebasic-Engineering, Kostenermittlung und Betriebsuche ermöglichten die Fixierung der Auslegungsgrundlagen einer Pilotanlage Stickstoff-recycling (Pilot-NRS). Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung führte zu positiven Ergebnissen. Entwicklung, Bau und Betrieb des Pilot-NRS mit Kühlung, Filterung, Adsorption, Desorption und Gasanalyse waren erfolgreich.

3.2 Erzielte Ergebnisse

Vereinbarung mit potentiellen Betreibern aus der Stahl- und Glas-Industrie für den Probebetrieb des Pilot-NRS wurden getroffen. Mit diesem Pilot-NRS durchgeführte Recycling-Versuche in der Stahlindustrie reinigten Stickstoff auf Einsatzqualität. Die Demonstrationsergebnisse sind also positiv und auf Basis dieser Ergebnisse kann eine Anlage im Produktionsmaßstab (Produktion-NRS) entwickelt werden. Die Wirtschaftlichkeit einer Produktion-NRS wurde durch Auslegung, Kostenabschätzung, Erlösberechnung und Amortisationsermittlung ermittelt. Die Amortisation der Produktion-NRS scheint nach derzeitigem Kenntnisstand – in Abhängigkeit der lokalen Kosten für N_2 – unter drei Jahren möglich.

Ein weiterer Einsatz mit einem Betreiber einer Flachglas-Produktionsanlage ist vereinbart und im ersten Halbjahr 2017 geplant.

3.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Das Pilot-NRS sollte an weiteren Anlagen (z. B. Flachglasanlage) temporär installiert werden, um auch dort – mit den jeweils unterschiedlichen Gaszusammensetzungen – den Verfahrensnachweis zu führen und die Technologie proaktiv zu bewerben.

Parallel soll eine Skalierung des entwickelten Verfahrens auf Produktionsmaßstab für die Stahl-Industrie erfolgen. Ggfs. ist eine weitere Förderung dieses Schritts notwendig.

Die Prüfung der Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens für Produktionsprozesse mit Schutzgasmengen ab 100 bis 200 Nm^3/h – von welchen es eine erhebliche Anzahl z. B. im Bereich der Eisen und nicht-Eisen Metallurgie gibt - sollte erfolgen. Ggfs. kann das Pilot-NRS dort zu Demonstrationszwecken eingesetzt werden.

3.4 Förderung des Vorhabens

LT GASETECHNIK bedankt sich für die Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Az: 32556/01-24/2 und für die äußerst gute Zusammenarbeit mit den beteiligten Mitarbeitern der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

4 Einleitung

4.1 Das Vorhaben „Pilotanlage Stickstoffrecycling“

In vielen thermischen Prozessen der industriellen Produktion werden Gas-Gemische eingesetzt, um die behandelten Produkte vor Luft-Sauerstoff zu schützen. Ziel ist es, Oxidations- bzw. Korrosionsprozesse zu verhindern. Die sogenannten Schutzgase bestehen oft aus einer Kombination von Stickstoff und Wasserstoff. Der inerte Stickstoff dient dazu, einen geringen Überdruck in Apparaten/Anlagen aufrecht zu halten, so dass durch Leckagen möglichst kein Luft-Sauerstoff eindringt. Der Wasserstoff dient als Reaktionspartner für den in den Anlagen befindlichen Rest-Sauerstoff, damit das Produkt keinen Schaden nimmt.

Nach der Nutzung im Prozess wird das Schutzgas typischer Weise in die Atmosphäre abgegeben – häufig ohne weitere Behandlung oder Nutzung. Bestehende Schutzgas-Recycling-Systeme beschränken sich auf die Rückgewinnung des enthaltenen Wasserstoffs durch Aufarbeitungsstufen. Dagegen werden Schutzgase in Prozessen mit sehr großem Schutzgasbedarf (400 Nm³/h und mehr) wie z. B. bei der Herstellung von Flachglas oder von kaltgewalztem Stahl, die einen hohen Anteil Stickstoff (z. B. 95%) und einen geringen Anteil Wasserstoff (z. B. 5%) haben, heute noch nicht recycelt.

Hier setzt das System zum Stickstoffrecycling an. Eine innovative Kombination aus geeigneten Reinigungsstufen bereitet das verbrauchte, durch den Prozess verunreinigte Schutzgas (Rohgas) wieder so auf, dass es wieder Einsatzqualität (Reingas) erhält. Der durch Reaktion im Produktionsprozess verbrauchte Wasserstoff-Anteil wird frisch zugemischt.

Für die Umwelt bedeutet dieses Gasrecycling in vieler Hinsicht eine Entlastung:

1. Bisher ungereinigte Gase gelangen kaum noch in die Atmosphäre (je nach Ergebnis des Vorhabens bis zu 95% Emissionsreduktion).
2. Eine erhebliche Energieeinsparung wird durch die deutlich reduzierte Menge an frischem Schutzgas erreicht. Die energieintensive Erzeugung von frischem Stickstoff nach dem Tiefkalt-Luft-Zerlegungsverfahren wird auf ein Minimum reduziert. Somit wird die Gesamt-CO₂-Bilanz des Herstellungsprozesses verbessert: Diese kann z.B. in der Flachglasproduktion oder in Kaltwalzwerken für Stahl um ca.(!) 2.000 Tonnen CO₂ pro Jahr und Fertigungslinie betragen.

Dabei lassen Investitionen in diese Technologie eine sehr gute Wirtschaftlichkeit erwarten: Produzenten können mit Kosteneinsparungen in Größenordnungen rechnen, die die Amortisation der Investition innerhalb von max. 2-4 Jahren ermöglicht und daher die Herstellkosten des Produktes um 1% bis 3% senken.

4.2 Das Unternehmen LT GASETECHNIK

Seit über 40 Jahren in Dortmund ansässig, entwickelt, produziert und liefert LT GASETECHNIK technisch anspruchsvolle Armaturen und Anlagen für Industriegase.

Kerngeschäft ist die Entwicklung und Herstellung von gasetechnischen Hochleistungs-Anlagen, Gasmischern, in Serie gefertigte Armaturen und maßgeschneiderten Steuerungslösungen. Fertigung von Standardanlagen sowie von kundenspezifisch ausgelegten Anlagen mit höchstem Anspruch an Engineering, Sicherheit und Qualität.

Lieferprogramm:

- Gasetechnischer Anlagenbau
- Engineering, Produktion und IBN von Gasmisch-, Gasversorgungs- und Prüfanlagen nach Kundenspezifikation
- Dynamische Hochleistungs-Anlagen mit zugehöriger EMSR- und Analysetechnik
- Kundenspezifischer Gasanlagenbau

Gasmischtechnik

- Gasmischer für brennbare und nicht-brennbare Gase
- Statische und dynamische Gasmischer mit und ohne Mischgasbehälter
- Gasanalyse-Systeme

Gasetechnisches Equipment

- Druckregelstationen und Druckregelstrecken
- Flaschen- und Bündelbatterie-Anlagen
- Druckminderer, Armaturen und Gasfilter
- Sicherheitseinrichtungen

4.2.1.1.1.1.1.1 EMSR

- Steuerungs- und Regelungs-Lösungen
- Engineering, Steuerungsbau, SPS-Software-Erstellung
- Verfahrenstechnische EMSR-Auslegung
- Standardlösungen für gasetechnische Applikationen

4.3 Zielsetzung und Umweltwirkung des Projekts

Im Wesentlichen entsteht die Umweltwirkung aus zwei Effekten:

1. Verunreinigtes Schutzgas wird nicht mehr an die Umwelt abgegeben
2. Energie zur Erzeugung von frischem Schutzgas wird eingespart

4.3.1 Zusammensetzung verunreinigter Schutzgase

Die Zusammensetzung verunreinigter Schutzgase variiert in Abhängigkeit der damit beaufschlagten Prozesse. Diese bestehen in der Flachglasindustrie (nach vertraulichen Betreiberangaben) im Wesentlichen aus:

N ₂ (vol.%)	98,46
H ₂ (vol.%)	1,00
O ₂ (vol.%)	0,50
H ₂ O (vol.%)	0,04
H ₂ S (ppm)	10,00
Staub (mg SnS)	20,00
SnS ₂ , SO ₂ , SO ₃ (ppm)	~0
HF, Cl ₂ , HCl, NO _x	~0

Tabelle 1: Mögliche Schutzgas-Verunreinigungen

Dabei werden die Staub- und Zink-Bestandteile häufig durch Zykclone vor der Abgabe in die Umwelt entfernt. In der Stahlverarbeitenden Industrie sind oft anstatt der Schwefelbestandteile Beladungen mit Verdampfungs- und Ver crackungsprodukten aus Petroleum, Alkoholen und Palmöl mit einem Siedebereich zwischen 140 und 380°C: 0,2 – 1 kg/h zu sehen.

Sämtliche Verunreinigungen, die ansonsten in die Umwelt abgegeben würden, werden durch den Reinigungsprozess entfernt, so dass es möglich wird Stickstoff im Kreislauf zu fahren.

4.3.2 Umweltwirkung Frischgaserzeugung

Bei der Erzeugung von einer Tonne Stickstoff werden ca. 350 kW_{el} verbraucht. Angenommene 8.500 Betriebsstunden und 1.000 Nm³/h N₂ Verbrauch führen zu einem jährlichen Energieeinsatz von rund 3.700 MWh.

Hierzu werden (bei im Durchschnitt angenommenen) 580 g CO₂ je kWh rund 2.160 t CO₂ pro Jahr erzeugt.

Durch das entwickelte Recyclingverfahren könnten davon ca. 95% oder rund 2.000 Tonnen CO₂ pro Jahr je 1.000 Nm³ Anlagenverbrauch eingespart werden.

Hierbei ist noch nicht berücksichtigt

- Transport
- Aufheizung
- Abkühlung
- Anlagentechnik

zur Erzeugung des N₂.

5 Hauptteil

5.1 Arbeitsschritte, Methoden, Ergebnisse

Ziel des Vorhabens ist es, die einwandfreie Funktion der Demonstrationsanlage zum Gasrecycling durch Versuchsreihen nachzuweisen und den Betrieb der Anlage zu optimieren. Ergebnisse sollen als Basis zur Entwicklung von Produktionsanlagen für verschiedene Losgrößen dienen.

Aufgrund der verschiedenen Verunreinigungen des Schutzgases ist ein Konzept auszuarbeiten, wie diese Schadstoffe aus dem Schutzgas entfernt werden können. Dazu sind geeignete Adsorptionsmittel auszuwählen und die Reinigungsschritte zu planen. Die Anlage soll im Demonstrationsmaßstab ausgelegt und gefertigt werden. Diese soll dann an einer Kaltwalzlinie eines Stahlwerks, in Betrieb genommen werden. Anschließend soll für einen aussagekräftigen Betrieb die Analysetechnik getestet werden. Teil der Inbetriebnahme ist, eine aussagekräftige Analyse des Rohgases durchzuführen, um die Verunreinigungen zu identifizieren. Durch die Versuche sollen außerdem die Standzeiten der einzelnen Reinigungsstufen ermittelt und Regenerationsmöglichkeiten untersucht werden.

Dies mit dem Ziel, anhand der Ergebnisse des Vorhabens eine Produktionsanlage mit der Fähigkeit zum kontinuierlichen Betrieb und in verschiedenen Dimensionen zu entwickeln.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

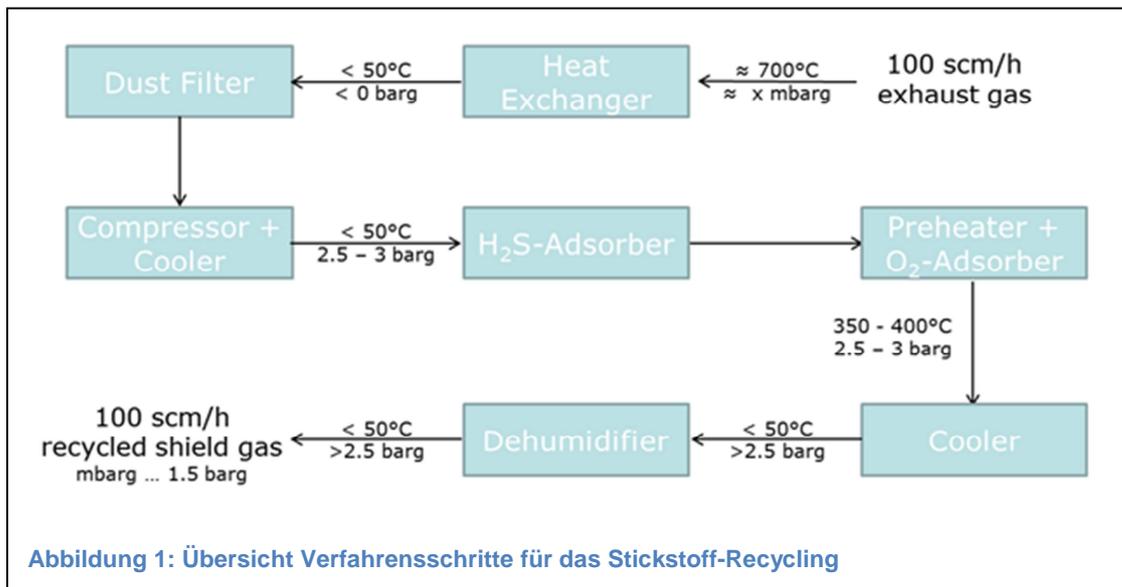
- Prebasic-Engineering
- Ermittlung der Wirtschaftlichkeit
- Betreibersuche
- Spezifikation, Entwicklung und Bau der Demonstrationsanlage
- Demonstration und Test

Diese werden nachfolgend im Detail erläutert.

5.1.1 Basic-Engineering

Das Basic-Engineering der Anlage im Demonstrationsmaßstab erfolgte auf Basis von Erfahrungswerten für die Roh- und Reingase.

Es wurden folgende Verfahrensschritte geplant:



Verfahrensschritte, die bei der Produktionsanlage erforderlich werden würden, wie z. B.

- Wärme-Rückgewinnung
- Adsorptionsmittel-Regeneration
- Prozessleitsystem-Einbindung
- Redundanzen
- Gas-Mischanlage zur Erzeugung eines angepassten N₂/H₂-Gemischs

wurden bei der Pilot-NRS aus Kostengründen nicht geplant. Die dargestellte Reinigungsstufe „H₂S-Adsorber“ wird voraussichtlich im Stahlwerk nicht benötigt, ist aber für das Flachglaswerk bereits vorgesehen.

Zur Erprobung der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Vorhabens erfolgte die grundlegende Verfahrensauswahl und das Basic Engineering mit dem Ziel des Einsatzes an einer Feuerbeschichtungsanlage an einem Stahlwerk unter Berücksichtigung des nachfolgenden Einsatzes in einem Flachglaswerk. Die Demonstrationsanlage soll bei LT GASETECHNIK vormontiert und anschließend zunächst an dem Stahlwerk installiert werden. Abbildung 2: Schematischer Ausschnitt der FBA8 [] zeigt die schematische Darstellung einer Feuerbeschichtungsanlage (FBA) mit den einigen Prozessschritten.

Die Demonstrationsanlage wird oberhalb des zehnstöckigen Glühofens aufgestellt und an dem Kamin angeschlossen. In dem Glühofen wird das endlose Stahlband unter einer Schutzgasatmosphäre auf eine Temperatur von ca. 800°C erhitzt, um einen entscheidenden Einfluss auf die Materialeigenschaften zu nehmen [(Lewandowski & Nothacker, 2014)]. Durch diesen Prozess, durch Leckagen, Rückständen auf dem Stahlband und Inhaltsstoffe des Stahlbands kommt es zur Verunreinigung des Schutzgases.

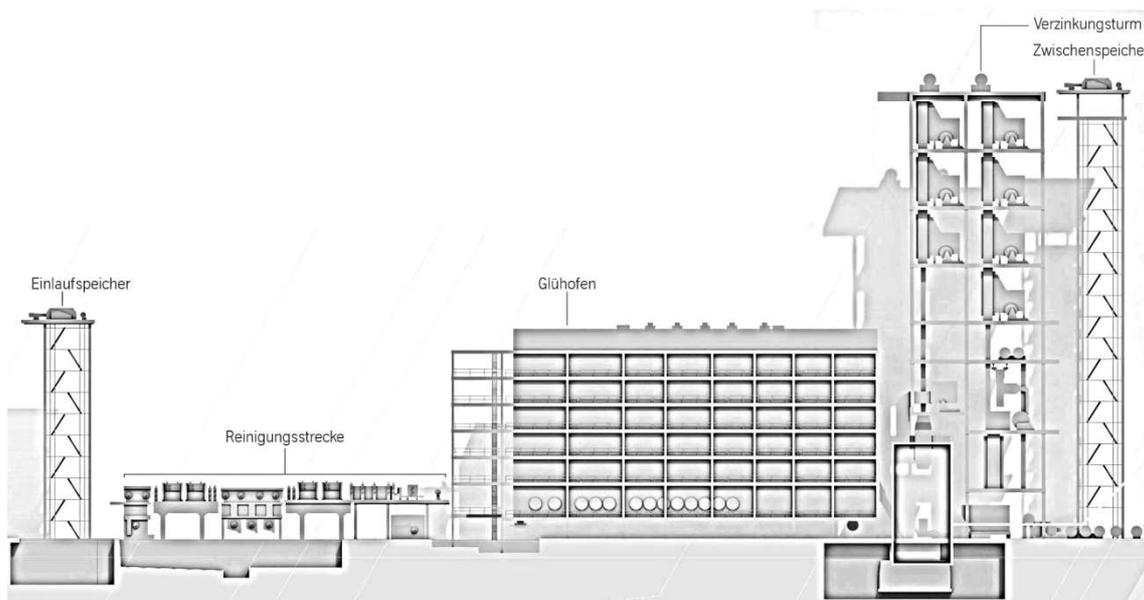


Abbildung 2: Schematischer Ausschnitt der FBA8 [(Lewandowski & Nothacker, 2014)]

Dabei ergeben sich durch die unterschiedlichen Prozesse an dem Stahlwerk und an dem Glaswerk unterschiedliche Probleme durch spezifische Verunreinigungen des Rohgases. Zu Beginn dieses Vorhabens lagen keine belastbaren Analysen des Rohgases vor, weshalb die Inhaltsstoffe und deren Konzentration für die Auslegung der Demonstrationsanlage abgeschätzt werden mussten. So wurde angenommen, dass das reine Schutzgas, bestehend aus Stickstoff und Wasserstoff, durch den Prozess im Stahlwerk mit jeweils geringen Mengen Stäuben, Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffen verunreinigt wurde. Bei dem Prozess im Flachglaswerk kommt zu den zuvor genannten Verunreinigungen noch Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff hinzu. Dort wird prozessbedingt punktuell Schwefeldioxid zugeführt, welches in das Schutzgas gelangen könnte und im Glas enthaltener Schwefel reagiert mit dem Wasserstoff des Schutzgases zu Schwefelwasserstoff.

Durch die verschiedenen Verunreinigungen mussten Reinigungsstufen entwickelt bzw. ausgewählt werden, welche in Kombination die geforderte Schutzgasreinheit sicherstellen können. Dabei ergaben sich vor allem Schwierigkeiten in der Unverträglichkeit einzelner Reinigungsstufen gegenüber den Verunreinigungen, weshalb bei der Reihenfolge der Stufen und

der Auswahl der Verfahren eine geschickte Auswahl getroffen werden musste. Damit keine Abnahme durch eine Zentrale Überwachungsstelle erforderlich wird, wurde eine Reinigungskombination verwendet, die auch unterhalb von 0,5 barü effektiv betrieben werden kann.

Aus den unterschiedlichen Inhaltsstoffen folgen auch unterschiedliche Anforderungen an die Analysetechnik und den verwendeten Sensoren. Die Anforderung seitens des Stahl- und Glaswerks lautet, eine Reinheit des Schutzgases sicherzustellen, die der Reinheit des Einsatzgases gleichkommt, weshalb auch das Analysesystem eine hohe Genauigkeit besitzen sollte.

5.1.2 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit

Zentrales Erfolgsmerkmal für dieses Projekt ist die Wirtschaftlichkeit. In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Patente angemeldet und Verfahren umgesetzt, die eine Schutzgasreinigung zum Inhalt hatten. Allen Verfahren gemein scheint aber eine mangelnde Wirtschaftlichkeit, da keine Umsetzung im Produktionsmaßstab erfolgte.

Daher wurde bei Design der Investitions-, Inbetriebnahme-, und Betriebskosten sowohl für Demonstrations- wie auch für die Produktionsanlage sehr stark Wert auf möglichst wirtschaftliche Lösungen gelegt.

Für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit sind auf der Erlösseite die Kosten für Stickstoff und Wasserstoff entscheidend. Diese unterscheiden sich jedoch stark (Faktor 3) durch lokale Gegebenheiten. Außerdem sind diese Kosten sehr vertraulich, da sie die Gesamtproduktionskosten signifikant beeinflussen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsrechnungen mussten also (auf Kenntnisse gestützte) Vermutungen angenommen werden.

Es zeigte sich bei den Diskussionen mit den Betreibern, dass eine Wirtschaftlichkeit des Produktions-NRS zwingend ist. Verantwortliche Stellen bei den Betreibern waren erst dann bereit Zeit, Arbeitskraft und Finanzielle Ressourcen für ein Pilot-NRS einzusetzen, wenn von vorneherein erwiesen wäre, dass ein Produktions-NRS wirtschaftlich betreibbar ist.

Daher mussten zunächst die Kosten eines Produktions-NRS abgeschätzt werden, ohne die letztendliche Machbarkeit und das letztendliche Design zu kennen.

Daher wurde der Punkt 5 der geplanten Arbeitsschritte: „Wirtschaftlichkeitsabschätzung einer Anlage im Produktionsmaßstab“, der auch als Breakpoint für das gesamte Projekt geplant war, zeitlich vorgezogen.

Noch bei der Beantragung des Projekts wurde davon ausgegangen, dass nahezu sämtliche Frischgasmengen (800 Nm³/h bis 1.400 Nm³/h) recycelt werden können. Während des Projektverlaufs hat es sich allerdings herausgestellt, dass das Recyceln von ca. 400 Nm³/h gebrauchtem Schutzgas in die derzeit bei den Betreibern vorhandene Anlagentechnik am wirt-

schaftlichsten integrierbar ist. Somit ist eine wesentliche Erkenntnis des Projekts, dass die Wirtschaftlichkeit auch bereits bei einer 400 Nm³/h Anlage gegeben sein muss.

Die Einzelheiten der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen hier aufzulisten würde den Rahmen sprengen. Es wurden aber alle Details, bis hin zu den Kosten für Kühlwasser, Stromverbrauch, Austausch Filter und Adsorptionsmittel berücksichtigt. Darüber hinaus wurden ebenfalls Kosten für duty stand-by equipment ermittelt, um einen 24/7 Betrieb sicher zu stellen.

Unter bestimmten Annahmen sei also beispielsweise in einem Flachglaswerk von folgenden Kosten im Betrieb ohne NRS auszugehen. Dabei ist unterstellt, dass nur rund 400 Nm³/h Schutzgas, bestehend aus 90% N₂ und 10% H₂ in diesem Bereich verbraucht werden:

Boundaries Float Glas Production					
Fresh shield gas					
Quantity:	N2 consumption	360	[scm/h]	3.096.000	[scm/y]
	H2 consumption	40	[scm/h]	344.000	[scm/y]
	H2 ratio	10%	H2 in N2		
	Operating hours /y	8.600	[h /y]	98,17	[% /y]
Costs:	N2 price	0,09 €	[€/scm]	273	[k€/y]
	H2 price	0,75 €	[€/scm]	258	[k€/y]
	Shield gas costs actually:			531	[k€/y]
Used atmosphere					
Quantity:	N2 exhaust	360,00	€ [scm/h]		
	H2 exhaust	-	€ [scm/h]		
Costs:	Make-up N2	5%	[%]	14	[k€/y]
	Make-up H2	100%	[%]	258	[k€/y]
	Shield gas costs with recycling:			272	[k€/y]
Saving (without capex for a Nitrogen Recycling System):				259	[k€/y]

Tabelle 2: Schutzgaskosten für 400 Nm³/h im Flachglaswerk - ohne NRS

Für Anschaffung, Installation und Betrieb eines LTG-NRS fallen dann folgende Kosten an:

Costs for a production-scale Nitrogen Recycling System for 400 scm/h						
Capital expenditures						
	Capital costs plant	550	[k€]			
	Transport, commissioning, implementation	55	[k€]			
	Total CAPEX:	605	[k€]			
Operating Costs						
	Catalyst replacements	17	[k€/y]	(not in the 1. year)		
	Operator costs (1/2 h per day)	4	[k€/y]			
	Cooling water (0.70 €/m ³)	7	[k€/y]			
	Electricity (0.130 €/kWh)	19	[k€/y]			
	Service and maintenance (2%/y)	11	[k€/y]	(not in the 1. year)		
	Total OPEX:	58	[k€/y]			
Amortisation		Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
	CAPEX	-605				
	OPEX	-30	-58	-58	-58	-58
	Savings	259	259	259	259	259
	Difference per year	-376	202	202	202	202
	Running Total	-376	-174	28	230	431
Amortisation in 2,5 years						

Tabelle 3: Kosten und Amortisation eines LTG-NRS für 400 Nm³/h

Eine Amortisation unter 2,5 Jahren ist also gegeben, sofern die Annahmen (Kosten für Reingas, Kosten für Anlage etc.) der jeweils vorzufindenden lokalen Realität entsprechen.

Daher konnte hier bereits als erstes Zwischenergebnis festgestellt werden. Nach vernünftiger Abschätzung ist eine Anlage im Produktionsmaßstab wirtschaftlich. Entwicklung und Bau einer Demonstrationsanlage sollte erfolgen.

5.1.3 Betreibersuche

Parallel zum Basic-Engineering, Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und Engineering wurden mögliche Betreiber gesucht. Gefordert war Aufbau und Betrieb einer Demonstrationsanlage zu unterstützen, dies ohne zu wissen, ob letztendlich ein wirtschaftlicher Betrieb einer Produktionsanlage möglich sein wird. Insbesondere erforderlich sind

- Bereitstellung des Aufstellortes
- Zuleitung, Absperrung und Anschluss des heißen Rohgases
- Absperrung, Ableitung des Reingases, oder Zuführung des Reingases in den Prozess
- Analyse des Roh- und des Reingases
- Bereitstellung von Personal, Energie, Kühlwasser
- Prüfung und Festlegung rechtlicher Randbedingungen (Betreiberverantwortung, Verletzung lokaler Patente)

Für solche Forschungs- und Entwicklungsprojekte fehlen bei vielen Betreibern die personellen und finanziellen Ressourcen sofern damit nicht signifikante Einsparungserwartungen verbunden werden können.

Für LTG war es außerdem wichtig nicht zu viele Betreiber anzusprechen, um eine Rufschädigung im Falle des Scheiterns dieser Technologieentwicklung so gering wie möglich zu halten. Positiv zu vermerken ist, dass lediglich zwei Betreiber angesprochen wurden – einer aus der Stahlindustrie, einer aus der Flachglasindustrie – und sich beide Betreiber für die Versuche ausgesprochen haben. Entscheidend für die Zustimmung war die Abschätzung (einschl. Projekt-Engineering) der Amortisation einer Produktionsanlage, wie im Punkt „Ermittlung der Wirtschaftlichkeit“ diskutiert.

Nach einigen Gesprächen wurden zwei Standorte gefunden, die die Ressourcen für eine Zusammenarbeit bereitstellen konnten.

Mit beiden Betreibern und Standorten wurde die Zusammenarbeit formalisiert. Dabei wurden im Wesentlichen folgende Punkte geregelt:

- LTG übernimmt den Transport von LTG bis zum Betreiber Installation und Einbringung in Gebäude durch Betreiber
- Tragung des Montagerisikos durch LTG
- LTG übernimmt die Betreiberverantwortung. LTG erstellt die Gefährdungsbeurteilung und wird Maßnahmen zur Vermeidung vor Gefährdungen vorsehen.
 - o In Verantwortung LTG erfolgt:
 - Schulung und Arbeitssicherheits-Unterweisung der Betreiber-Mitarbeiter
 - Reinigung, Entwässerung der Filter, Austausch von Betriebsmitteln
 - Kontrolle auf Schäden, Dichtheitsprüfungen, wenn erforderlich
 - Wartung unter Verwendung nur zugelassener Ersatzteile, wenn erforderlich Funktionsprüfung der sicherheitstechnischen Ausrüstung
 - Leitung Probetrieb
 - o In Verantwortung des Betreibers erfolgt:
 - Äußerer Schutz (Anfahrtschutz)
 - Zutrittsverbote
 - Warnschilder und Gebotsschilder (Tragen persönlicher Schutzausrüstung)
 - Schutz vor dem Berühren heißer Oberflächen
 - Notfallübungen ggfs. mit externen Stellen (Feuerwehr)
 - Stellvertretende Leitung des Probetriebs nach Schulung und Einweisung durch LTG
- Versicherung während des Betriebs wird durch LTG getragen (z. B. Feuer, Sturm, Hagel etc.)
- Umschaltung von „Abblasen gereinigtes Gas“ auf „Rückführung in Anlage“ auf Verantwortung des Betreibers
- Wartung, Instandhaltung, Austausch von Adsorptionsmitteln durch LTG auf Kosten von LTG.

Für LTG war es insbesondere wichtig, dass ausgeschlossen wird, dass LTG haftbar gemacht werden könnte für Schäden am Produkt des Betreibers, die aus der Wiederverwendung des Probeweise recycelten Schutzgases entstehen könnten (Folgekostenausschluss).

5.1.4 Spezifikation, Entwicklung und Bau der Demonstrationsanlage

Das NRS besteht aus einer Kombination von Wärmetauschern, Filtern, Katalysator-/Adsorptionskolonnen und einem Verdichter in einem verzinkten Stahlgerüst. In dem Stahlgerüst sind zudem der Schaltschrank – für die Steuerung der Anlage –, eine Messgasaufbereitung und Gasmessung montiert. Die Anlage wurde für die Reinigung und Rückführung von ca. 100 Nm³/h gebrauchtem Schutzgas und einen diskontinuierlichen Betrieb ausgelegt.

Der Gaseingang der Anlage wird direkt an den Abgaskamin des Glühofens im Stahlwerk angeschlossen, die Verrohrung erfolgt aufgrund der hohen Gastemperaturen mit Edelstahl als Werkstoff. Hinter dem Eingang der Anlage ist der erste Gas–Luft–Wärmetauscher angeordnet. Dieser dient zur Abkühlung des eintretenden, benutzten Schutzgases von bis zu 700 °C auf ca. 50 °C. Die Abkühlung des Schutzgases ist notwendig, da das Schutzgas im heißen Zustand nur mit hohem Kostenaufwand zu behandeln wäre. Der Wärmeaustausch erfolgt im Gegenstromprinzip, wobei die Wärmeenergie auf die Umgebungsluft übertragen wird. Zur Vergrößerung des Wärmeübergangs und zur Regelung der Austrittstemperatur des Schutzgases befinden sich an dem Wärmetauscher zwei regelbare Axialventilatoren, welche kühle Umgebungsluft über die Wärmeübertragerfläche fördern.

Nach dem Wärmetauscher werden in einem Zyklonabscheider mitgetragene oder durch Kondensation im Wärmetauscher entstandene Flüssigkeiten und Grobstäube aus dem Gasstrom abgetrennt. Durch zwei Feinfilter werden Feinstäube abgeschieden, damit ausschließlich gasförmige Komponenten in den Verdichter gelangen. Die beiden Feinfilter sind parallel angeordnet, um den Druckverlust über die Filter zu verringern. Vor dem Verdichter ist ein digitaler Massendurchflussmesser angeordnet, um den Gasvolumenstrom in der Anlage berechnen zu können. Anschließend wird der Gasstrom mit Hilfe eines trocken und berührungslos laufenden Verdichters auf maximal 0,44 barü verdichtet, um die Druckverluste der Gasreinigungsstrecke zu kompensieren. Vom Ausgang zum Eingang des Verdichters ist ein regelbarer Bypass geschaltet, um außerhalb der elektronischen Regelung des Verdichters die Fördermenge und den Druck zu beeinflussen. Das Gas hat nach dem Verdichten eine Temperatur von ca. 100 °C.

Dem Verdichter folgt ein Flansch zur optionalen Beimengung von Wasserstoff, Luft oder Sauerstoff, falls diese nicht in ausreichender Konzentration für die nachfolgenden Reinigungsschritte im Schutzgas zur Verfügung stehen. Bei Bedarf kann an diesen Flansch eine Gasflasche mit Druckregler und einem beliebigen Gasgemisch angeschlossen werden. In die Rohrverbindung zum nächsten Reinigungsschritt wurde ein federgesteuertes Überdruckventil eingebracht, welches bei einem Druck von 0,5 barü auslöst und den Gasstrom sicher über eine Abgasleitung verwirft.

Der letzte Reinigungsschritt besteht aus einer Kolonne zur Entfernung der Restfeuchte des Gases. Die Schüttung adsorbiert und bindet bei niedriger Temperatur im Gas enthaltenes Wasser. Zur Regeneration der Adsorbens wird die Kühlleistung des vorgeschalteten Wärmetauschers deutlich reduziert, um einen Gasstrom mit einer Temperatur von ca. 180°C durch das Adsorbens zu leiten und die gebundenen Moleküle zu lösen und auszutragen. Sofern die Temperatur am Austritt der Katalyse für eine Regeneration nicht ausreichend ist, so kann über einen Flansch vor der Kolonne ein heißes Gas zur Regeneration eingeleitet werden. Der Regenerationsgasstrom wird verworfen und nicht zurückgeführt.

Am Ende der Reinigungsstrecke befindet sich zwei elektrisch angesteuerte Pneumatikventile für zwei Ausgänge der Anlage. Ein Ausgang dient zum Zurückführen des gereinigten Schutzgases in den Glühofen, dieser ist mit einem weiteren Feinstaubfilter versehen, damit kein Abrieb der Adsorptionsmittel in den Glühofen eingetragen wird. Der zweite Ausgang dient zum Verwerfen des Gases bei Regeneration der Entfeuchtung oder für den Fall, dass die geforderte Schutzgasqualität nicht erreicht wird. Dieser Ausgang führt das Gas sicher über Dach ab, weshalb dort auch die Abgasleitung des Überdruckventils nach dem Pneumatikventil eingeleitet wird.

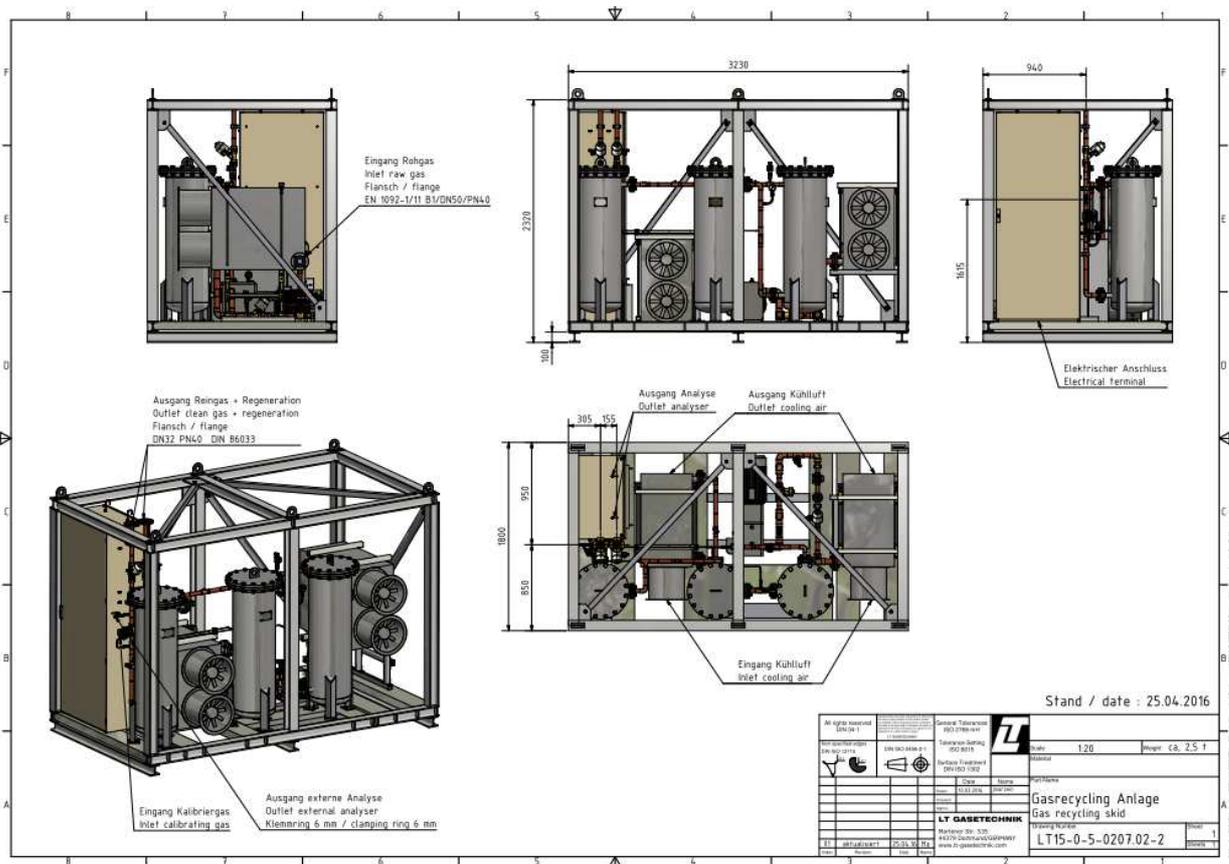


Abbildung 4: Aufbau des Pilot-NRS im 3-D-Diagramm

Der gesamte Reinigungsprozess wird durch eine Vielzahl von Mess- und Analyseeinrichtungen überwacht. Um möglichst viele Analysedaten zu erhalten, wurden an der gesamten Demonstrationsanlage Sensoren zur Erfassung der Temperatur und des Drucks, ein Sensor zur Messung des Massendurchflusses und eine Kombination von Gasanalysatoren verbaut.



Abbildung 5: Pilot-NRS während der Fertigung. Stand Anfang August 2016

5.1.5 Demonstration und Test

Zu Beginn des Demonstrationsbetriebes an dem Stahlwerk wurde über einen Analyseabgang vor der ersten Reinigung eine Rohgasprobe entnommen. Die Rohgasprobe wurde im Labor auf die enthaltenen Bestandteile analysiert. Neben den Ausgangsstoffen Stickstoff und Wasserstoff wurden folgende Verunreinigungen identifiziert: Sauerstoff, Wasser, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Methan. Da die Stoffe nicht als Katalysator- oder Adsorptionsmittelgift gelten, konnte anschließend die Reinigung in Betrieb genommen werden.



Bei der Inbetriebnahme wurden Temperatur- und Druckprofile ermittelt und der optimale Betriebszustand auf Grundlage der Ergebnisse eingestellt. Dabei wurde festgestellt, dass die reale Eingangstemperatur des Rohgases wesentlich geringer ist als erwartet, da die Zuleitung zur Pilot-NRS anfangs nicht isoliert wurde. Dadurch reichte die Temperatur nicht für einen vollständigen Umsatz des Sauerstoffes im Katalysator. Durch eine Isolierung der Zuleitung durch den Betreiber wurde dieses Problem gelöst. Die anschließende Entfeuchtung des Gases zeigte auf Anhieb eine einwandfreie Funktion.

Die strömungsbedingten Druckverluste durch die Rohrleitungen, Einbauten und Schüttungen haben zur Folge, dass ein maximaler Ausgangsdruck der Anlage von 0,2 - 0,25 barü erreicht werden kann. Bei höheren Ausgangsdrücken löst das Überdruckventil nach dem Verdichter aus. Der Durchsatz des Pilot-NRS wird durch das Vakuum vor dem Verdichter erheblich beeinflusst. Aus diesem Grund wurden die zuerst eingesetzten PE-Filter (Durchsatz max.: 71 Nm³/h) durch Edelstahlfilter mit geringerem Strömungswiderstand ersetzt. Bei einem Ausgangsdruck von 0,2 barü und maximaler Verdichterleistung wird ein Durchsatz von rund 92 Nm³/h erreicht (geplanter Durchsatz: 100 Nm³/h). Aufgrund einer erheblichen Schallemission bei voller Verdichterleistung wurde diese im Nachgang auf 93% begrenzt. Ein Durchsatz von rund 86 Nm³/h wird erreicht.

Bei der Katalyse wurde ein Temperaturanstieg auf 180 – 220 °C erwartet. Dieser blieb aufgrund einer geringen Sauerstoffkonzentration aus. Deshalb mussten im Rahmen des Testbe-

triebess Lösungen (Isolierung, Bypass) gefunden werden, um eine genügend hohe Temperatur (min. 120 °C, besser 180 °C) zur Regeneration der Trocknung zu erzeugen.

Im Rahmen des Demonstrationsbetriebes wurden zudem Abschaltkriterien und Grenzwerte für die Prozesswerte ermittelt und in der Programmierung verankert, sodass jederzeit ein sicherer Betrieb des Pilot-NRS gewährleistet werden kann. Des Weiteren wurden automatische Abläufe zur einfachen und fehlerfreien Bedienung der Anlage implementiert.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Das Pilot-NRS konnte während der Demonstrations- und Testphase überzeugende Ergebnisse bei der Reinigung des Schutzgases erbringen. Dabei konnte neben dem Stickstoff ein Großteil des enthaltenen Wasserstoffes zurückgewonnen werden.

Die unerwarteten Verunreinigungen (Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Methan) werden mit der aktuellen Ausführung des Pilot-NRS nicht aus dem Gasstrom entfernt. Dazu müsste ein anderes Adsorptionsmittel (z.B. Molekularsieb) verwendet werden. Die Wirksamkeit des Molekularsiebes muss noch überprüft werden. Gegebenenfalls ist eine Entfernung der Verunreinigungen nicht notwendig, wenn diese in der vorliegenden geringen Konzentration keine Auswirkung auf die Produktqualität und den schutzgasverbrauchenden Prozess haben. Hier sind Vorgaben des Betreibers und dann ggfs. weitere Versuche erforderlich.

Zur Erreichung der gewünschten Volumendurchsätze wird in Zukunft eine großzügigere Auslegung der Rohrleitungen, Zyklone und Filter vor dem Verdichter benötigt, um die Ausbildung des Vakuums zu verringern und die Ansaugleistung zu erhöhen. Auch die Rohrleitungen nach dem Verdichter sollten großzügig ausgeführt werden, um die Druckverluste zu minimieren. Zumindest im Stahlwerk sind die Temperaturverluste über die Ansaugstrecke so hoch, dass auf einen Wärmetauscher verzichtet werden kann, ggfs. in der Pilot NRS eine Isolierung vorzusehen ist, damit die Aktivierungstemperatur des Katalysators erreicht wird.

Im Flachglaswerk ist mit deutlich höheren Temperaturen zu rechnen. Entsprechende Versuche mit dem Pilot-NRS stehen aus, sind aber fest für 2017 mit einem gefundenen Partner geplant.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung hat eine Amortisation von unter drei Jahren nachgewiesen, so dass die Installation von Produktions-NRS für die angesprochenen Betreiber nicht unattraktiv erscheint. Hier müssen allerdings konkrete Auslegungen der Produktions-NRS und die dann darauf folgenden Budgetierungsprozesse der Betreiber abgewartet werden. Amortisationszeiten von 2-3 Jahren sind nämlich teilweise nicht hinreichend.

5.3 *Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung*

5.3.1 **Ökologische Bewertung**

Das Pilot-NRS sollte und kann keinen wesentlichen Beitrag leisten. Das Produktions-NRS wird die – während der Projekt-Beantragung bereits erläuterten – ökologischen Beiträge leisten. Zu erwarten ist, dass das Produktions-NRS zum Recycling von 400 Nm³/h je Produktionslinie eingesetzt werden wird. Durch das entwickelte Recyclingverfahren könnten davon ca. 95% oder rund 800 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden. Der ökologische Beitrag hängt also von der künftigen Verbreitung ab.

Zusammenfassend schürt das geförderte Vorhaben gute Erwartungen auf künftigen ökologischen Nutzen.

5.3.2 **Technologische Bewertung**

Die Versuche zeigten die technologische Machbarkeit. Durch die Versuchsanlage wurden weitere wichtige Details, wie z. B. die Gaszusammensetzung des gebrauchten Schutzgases, für die Auslegung der Produktionsanlage in Erfahrung gebracht. Durch die Versuche wurden wichtige Auslegungsgrundlagen für die Produktionsanlage wie z. B. Art und Umfang der Filterstufen, Temperatur des Schutzgases am Eingang der Anlage, Art der Sorbenzien, erarbeitet, die ohne die Versuche nicht verfügbar wären.

Zusammenfassend ist das geförderte Vorhaben technologisch ein Erfolg.

5.3.3 **Ökonomische Bewertung**

Die Erzeugungskosten technischer Gase werden hauptsächlich durch Energiekosten beeinflusst. Durch die niedrigen Energiepreise sind daher Erzeugungskosten und somit auch Preise der technischen Gase niedrig.

In der Industrie gibt es einen Trend zu Erwartungen an sehr niedrige Amortisationszeiten. Teilweise werden Zeiten von unter 1,8 Jahren gefordert. Begrenzte Investitionsbudgets werden mit Anlagentechnik ausgelastet, die diese Anforderungen erfüllt.

Vor diesem Hintergrund wurde die entscheidende Forderung nach Rentabilität und kurzer Amortisation des NRS noch mal verschärft.

Das geförderte Vorhaben hat gezeigt, dass eine Amortisation des Produktion-NRS– in Abhängigkeit der lokalen Kosten für N₂ – von unter drei Jahren möglich scheint.

Ob dies für einen hinreichenden Anreiz zur Investition in die Technologie ausreicht, werden die nächsten Verhandlungen mit den Betreibern zeigen.

5.4 Verbreitung der Vorhabenergebnisse

Die Verbreitung der Vorhabenergebnisse erfolgt im Wesentlichen nach den Methoden des B-2-B-Vertriebs mit dem Vorteil, dass die Machbarkeit effektiv durch Aufbau und Betrieb der Demonstrationsanlage vor Ort beim Interessenten oder auch auf Messen nachgewiesen werden kann.

5.4.1 Fortführung der Demonstration

Die Demonstrationsanlage soll auch nach Projektende bei einem Flachglaswerk weiter betrieben werden. Dies ermöglicht das Sammeln von Betriebserfahrung im Demonstrationsmaßstab. Die Vorführung der Technologie für andere interessierte Betreiber an eigenen Anlagen ist eine weitere Möglichkeit der Verbreitung der Vorhabenergebnisse.

Die Demonstrationsanlage kann darüber hinaus an anderen Anlagen der Stahl- und Flachglasindustrie weltweit temporär verwendet werden, um auch dort – mit den jeweils unterschiedlichen Gaszusammensetzungen – den Verfahrensnachweis zu führen und das Verfahren proaktiv zu bewerben.

Das Pilot-NRS soll ebenfalls für Produktionsprozesse mit Schutzgasmengen ab 100 bis 200 Nm³/h eingesetzt werden – von welchen es eine erhebliche Anzahl z. B. im Bereich der Eisen und nicht-Eisen Metallurgie gibt. Hier ist ein persönliches Marketing bei den Betreibern dieser Anlagen erforderlich.

5.4.2 Ausweitung in den Produktionsmaßstab

Eine Installation im Produktionsmaßstab ist bei dem Betreiber des Kaltwalzwerks für Stahl, bei dem der erfolgreiche Test stattgefunden hat, für 2017 gewünscht; mögliche Förderungen werden derzeit geprüft.

In Deutschland sind weitere 10 Kaltwalzwerke in Betrieb, die durch persönliche Ansprache umworben werden. Weltweit agierende Betreiber von Kaltwalzwerken haben bereits Interesse geäußert und prüfen die Wirtschaftlichkeit.

Bei positiven Resultaten der laufenden Tests wird der Flachglashersteller den weltweiten Einsatz des Produktion-NRS prüfen, dessen Wirtschaftlichkeit von den jeweiligen lokalen Schutzgaspreisen und bestehenden Vertragsmodalitäten mit den Schutzgasversorgern abhängig ist. Weitere Flachglashersteller werden mit den Testergebnissen angesprochen. Ggfs. wird das Pilot-NRS bei weiteren Flachglasherstellern zu Demonstrationszwecken eingesetzt.

5.4.3 Veröffentlichungen

Fachbeiträge für folgende Medien sind in Vorbereitung:



- Homepages:
 - o LT GASETECHNIK
 - o Industrieverband Feuerverzinken
 - o Bundesverband Glasindustrie
- Zeitschriften:
 - o Prozesswärme
 - o gas wärme international
 - o Zeitschrift heat processing
 - o Stahl & Eisen
 - o Glass International

Gegebenenfalls (finanziell sehr aufwändig) ist die Ausstellung des Pilot-NRS auf folgenden Messen möglich:

- Glasstec 2018, Düsseldorf
- Thermprocess 25-29.06.2019, Düsseldorf

6 Fazit

Durch das geförderte Vorhaben wurde es möglich, die technische Machbarkeit des Schutzgas-Recyclings mit einer Demonstrationsanlage zu zeigen.

Im Rahmen des Projekts durchgeführte Prebasic-Engineering, Kostenermittlung und Betriebsuche ermöglichten die Fixierung der Auslegungsgrundlagen einer Pilotanlage Stickstoffrecycling (Pilot-NRS). Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung führte zu positiven Ergebnissen. Entwicklung, Bau und Betrieb des Pilot-NRS mit Kühlung, Filterung, Adsorption, Desorption und Gasanalyse waren erfolgreich.

Vereinbarung mit potentiellen Betreibern aus der Stahl- und Glas-Industrie für den Probebetrieb des Pilot-NRS wurden getroffen. Mit diesem Pilot-NRS durchgeführte Recycling-Versuche in der Stahlindustrie reinigten Stickstoff auf Einsatzqualität. Die Demonstrationsergebnisse sind also positiv und auf Basis dieser Ergebnisse kann eine Anlage im Produktionsmaßstab (Produktion-NRS) entwickelt werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer Produktion-NRS wurde durch Auslegung, Kostenabschätzung, Erlösberechnung und Amortisationsermittlung ermittelt. Die Amortisation der Produktion-NRS scheint nach derzeitigem Kenntnisstand – in Abhängigkeit der lokalen Kosten für N_2 – unter drei Jahren möglich.

Durch den künftigen Betrieb der Pilot-NRS an weiteren Anlagen kann der Verfahrensnachweis geführt und das System beworben werden.

Eine Skalierung des entwickelten Verfahrens auf Produktionsmaßstab für die Stahl-Industrie wird mutmaßlich beauftragt, sofern die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ausreichend ist.

Die Zusammenarbeit mit der Deutsche Bundesstiftung Umwelt war hervorragend.

7 Literaturverzeichnis

Lewandowski, D. J., & Nothacker, G. (2014). *ThyssenKrupp Steel AG: FBA 8 bringt Zink-Magnesium aufs Band*. Dortmund.